Caracterización de un módulo fotovoltaico

Díaz Steven[1]

[1]**EPN, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador**

1. Objetivo general

- Promover el cambio energético hacia recursos sostenibles mediante la implementación de sistemas fotovoltaicos.

2. Objetivos específicos

- Analizar la capacidad solar para establecer la factibilidad técnica de colocar paneles solares.
- Desarrollar modelos gráficos y estadísticos que representen el impacto de la adopción de paneles solares en la reducción de costos y emisiones de CO_2.
- Analizar la relación entre el ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico vs su eficiencia, de igual manera con el factor de llenado, mediante la creación de un diagrama de barras.

3. Introducción

Problemática nacional

En 2024, Ecuador enfrentó una crisis energética sin precedentes, con cortes de electricidad que alcanzaron hasta 14 horas diarias en diversas regiones. Esta situación fue atribuida principalmente a una sequía severa que afectó la capacidad de las centrales hidroeléctricas, las cuales suministran hasta el 69.1% de la electricidad del país [1].

Además, se identificaron fallas ya conocidas en el sector ingenieril de construcción en plantas hidroeléctricas clave, como la central Coca Codo Sinclair, inaugurada en 2016 con apoyo chino presentando diversos defectos [2].

Alternativa energética

La viabilidad de los paneles fotovoltaicos como fuente de generación eléctrica, se propone su implementación progresiva como una alternativa estratégica para mitigar la crisis energética en Ecuador. La instalación de sistemas solares permitiría reducir la dependencia de las hidroeléctricas y minimizar el impacto de sequías prolongadas en la disponibilidad de energía. Estudios previos realizados por CELEC EP tiene como primera visión para la generación de 3000 GWh al año, esto equivale al 10% de la demanda energética [3], han demostrado que la generación fotovoltaica puede integrarse eficientemente a la red eléctrica nacional, contribuyendo a la diversificación de la matriz energética y mejorando la estabilidad del suministro [3]. Asimismo, diversas investigaciones han evidenciado que el costo de los paneles solares ha disminuido significativamente en la última década, lo que los convierte en una opción económicamente viable para países con altos niveles de irradiación solar como Ecuador [4]. Con una adecuada inversión en infraestructura y políticas de incentivo, la energía solar podría representar una solución sostenible a largo plazo, garantizando un suministro energético más seguro y resiliente ante futuras crisis [4].

.

4. Metodología

En esta práctica, se realizará la caracterización de un módulo fotovoltaico mediante el análisis de su curva corriente-tensión (I vs V) en diferentes ángulos de inclinación. Para ello, se utilizará un laboratorio remoto, donde se configurarán seis inclinaciones específicas: horizontal (0°), igual a la latitud del lugar, latitud más 10°, 22°, 45° y 60°. En cada configuración, se registrarán datos clave como la temperatura del módulo, la irradiancia solar, la fecha y la hora. Con esta información, se trazarán las curvas I vs V y se calcularán parámetros importantes como el voltaje y corriente en el punto de máxima potencia (Vmax e Imax), el voltaje en circuito abierto (Voc), la corriente en cortocircuito (Isc), la potencia máxima (Pmax), la eficiencia (η) y el factor de llenado (FF). Posteriormente, el procedimiento se realizará en los laboratorios remotos de los campus de Cochabamba y Santa Cruz, lo que permitirá comparar el comportamiento del módulo en diferentes condiciones geográficas y ambientales. Finalmente, se analizarán los efectos de la latitud, altitud, y ángulo de inclinación en el rendimiento del módulo, y se contrastarán los resultados con los datos proporcionados por el fabricante. Este análisis permitirá identificar el ángulo de inclinación óptimo para maximizar la eficiencia y el factor de llenado, contribuyendo a una mejor comprensión del funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos en diversas condiciones [5] [6].

5. Resultados y discusiones

Gráficos y Tablas obtenidas

- **Cochabamba**

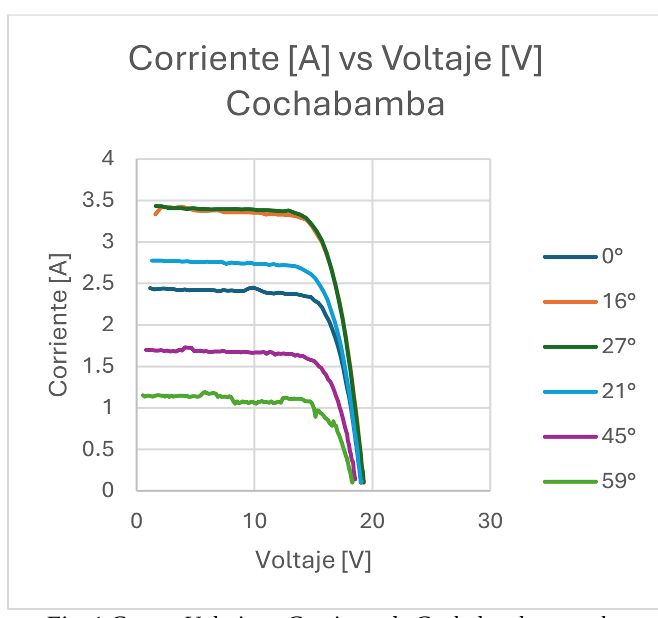


Fig. 1 Curvas Voltaje vs Corriente de Cochabamba para las diferentes inclinaciones.

Fuente: Propia

Tabla 1. Datos obtenidos de Cochcabamba.

Inclinación [grados]	Vmax [V]	Imax [A]	Voc [V]	Isc [A]	Pmax [W]	n	FF
0	15.42	2.27	19.09	2.45	34.95	10.265	0.748
16	14.87	3.19	19.29	3.43	47.45	14.471	0.717
27	15.28	3.13	19.24	3.43	47.82	15.741	0.725
21	15.18	2.56	19.06	2.78	38.83	12.207	0.733
45	15.03	1.57	18.62	1.73	23.55	9.786	0.733
59	15.23	1.55	18.93	1.7	23.61	13.441	0.73

Fuente: Propia

- **Santa Cruz**

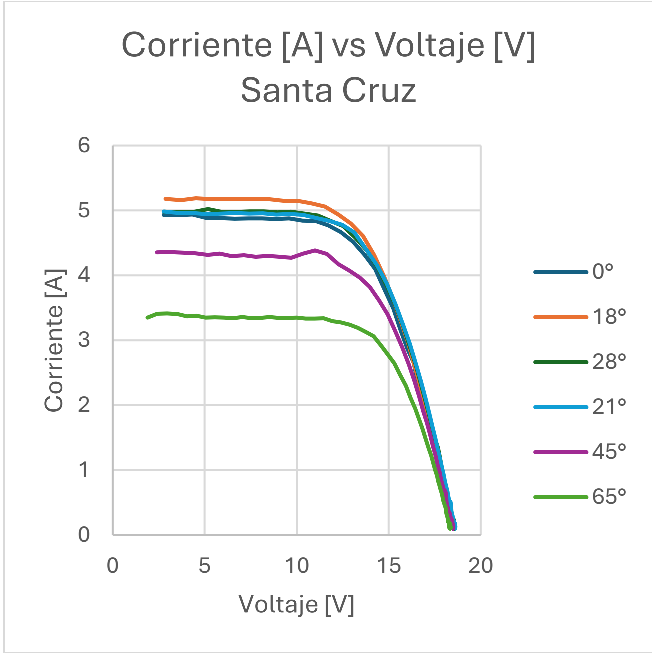


Fig. 2 Curvas Voltaje vs Corriente para Sant Cruz a diferentes inclinaciones.

Fuente: Propia

Tabla 2 Datos obtenidos de Santa Cruz.

Inclinación [grados]	Vmax [V]	Imax [A]	Voc [V]	Isc [A]	Pmax [W]	n	FF
0.00	13.69	4.31	18.51	4.94	59.04	9.47	0.65
18.00	13.61	4.60	18.50	5.19	62.66	10.33	0.65
28.00	13.82	4.38	18.60	5.02	60.59	10.89	0.65
21.00	13.14	4.66	18.63	4.98	61.23	10.71	0.66
45.00	13.97	3.82	18.51	4.38	53.37	12.48	0.66
65.00	14.19	3.06	18.36	3.41	43.44	17.06	0.69

Fuente: Propia

Discusiones

En el análisis de los datos obtenidos para los módulos fotovoltaicos en Cochabamba y Santa Cruz, se observa que la altitud, latitud y ángulo de inclinación tienen un impacto significativo en la generación de energía. Estos factores influyen directamente en la irradiancia solar recibida por el módulo, lo que a su vez afecta los parámetros clave como la corriente, el voltaje, la potencia máxima, la eficiencia y el factor de llenado. La altitud afecta la densidad del aire y la cantidad de radiación solar que llega a la superficie. En general, a mayor altitud, la atmósfera es menos densa, lo que reduce la dispersión y absorción de la radiación solar, aumentando la irradiancia. Esto se refleja en los datos de Cochabamba, donde se observa una mayor eficiencia en comparación con Santa Cruz, especialmente en ángulos de inclinación más altos. Por ejemplo, en Cochabamba, con una inclinación de 59°, la eficiencia alcanza un 13.441% (Tabla 1), mientras que, en Santa Cruz, con una inclinación de 65°, la eficiencia es del 17.06% (Tabla 2). Esto sugiere que, a mayor altitud, el módulo fotovoltaico puede aprovechar mejor la radiación solar, incluso en ángulos de inclinación más pronunciados.
La latitud determina el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre. En latitudes más cercanas al ecuador, como Santa Cruz, el sol incide de manera más directa durante todo el año, lo que resulta en una mayor irradiancia. Esto se evidencia en los valores de corriente en cortocircuito (Isc) y potencia máxima (Pmax) en Santa Cruz, que son consistentemente más altos que en Cochabamba, por ende, en Santa Cruz, con una inclinación de 0°, la Pmax es de 59.04 W (Tabla 2), mientras que, en Cochabamba, con la misma inclinación, la Pmax es de 34.95 W (Tabla 1). Esto indica que, en latitudes más bajas, el módulo fotovoltaico puede generar más energía debido a la mayor irradiancia solar directa. El ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico es crucial para maximizar la captación de radiación solar. Los datos muestran que, en general, existe un ángulo óptimo de inclinación que maximiza la eficiencia y la potencia generada. En Cochabamba, el ángulo de 27° presenta la mayor eficiencia (15.741%) y potencia máxima (47.82 W), mientras que, en Santa Cruz, el ángulo de 21° ofrece la mayor potencia máxima (61.23 W) y una eficiencia del 10.71%. Esto sugiere que el ángulo óptimo varía según la latitud y las condiciones locales. Además, se observa que, a medida que el ángulo de inclinación aumenta más allá del óptimo, la eficiencia y la potencia disminuyen, ya que el módulo recibe menos radiación directa.

La altitud, latitud y ángulo de inclinación son factores críticos que influyen en el rendimiento de los módulos fotovoltaicos. La altitud afecta la irradiancia solar recibida, la latitud

determina el ángulo de incidencia de la radiación, y el ángulo de inclinación debe ajustarse para maximizar la captación de energía. Estos aciertos son esenciales para optimizar el diseño y la instalación de sistemas fotovoltaicos en diferentes ubicaciones geográficas, asegurando un rendimiento óptimo y una mayor generación de energía.

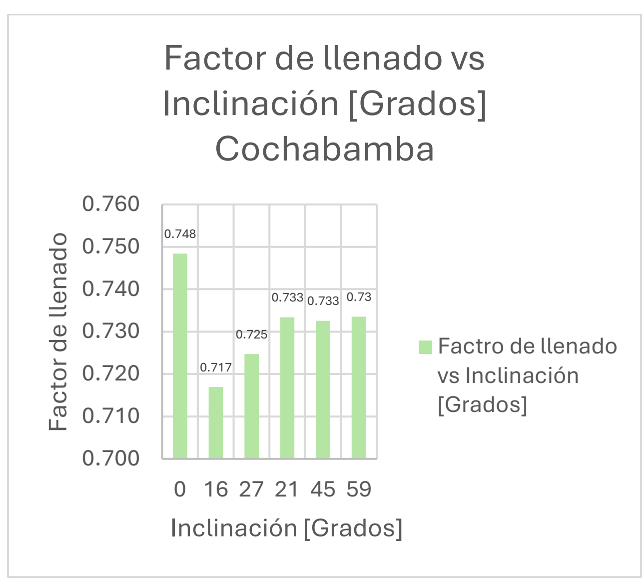


Fig. 3 Factor de llenado vs Inclinación [grados], Cochabamba.

Fuente: Propia

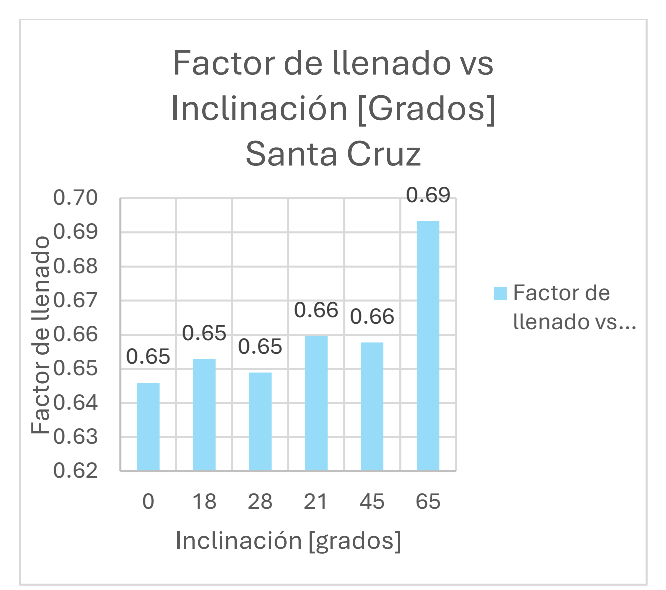


Fig. 4 Factor de llenado vs Inclinación [grados], Santa Cruz.

Fuente: Propia

En este análisis, se comparan los resultados del factor de llenado (FF) en dos ciudades, Cochabamba y Santa Cruz, con el objetivo de entender cómo el comportamiento de los módulos fotovoltaicos varía según la ubicación geográfica y el ángulo de inclinación. El factor de llenado es un indicador clave de la calidad y eficiencia de un módulo fotovoltaico, ya que representa la relación entre la potencia máxima real y la potencia teórica máxima que podría generar el módulo. Un FFmás cercano a 1 indica un mejor rendimiento del módulo.

En Cochabamba, el factor de llenado muestra valores relativamente altos, con un rango que oscila entre 0.717 y 0.748. Esto indica que los módulos fotovoltaicos en esta ciudad tienen un buen rendimiento en términos de eficiencia eléctrica. El valor más alto de FF (0.748) se alcanza con una inclinación de 0°, lo que sugiere que, en esta ubicación, una inclinación horizontal permite una mejor transferencia de energía desde el módulo al circuito. Sin embargo, a medida que el ángulo de inclinación aumenta, el FF disminuye ligeramente, alcanzando un valor de 0.73 en inclinaciones de 45° y 59°. Esto se debe a que, en ángulos más pronunciados, el módulo recibe menos radiación solar directa, lo que afecta su capacidad para generar energía de manera óptima. En Santa Cruz, el factor de llenado es ligeramente más bajo que en Cochabamba, con valores que oscilan entre 0.65 y 0.66. Esto indica que, aunque los módulos funcionan de manera eficiente, su rendimiento es un poco menor en comparación con Cochabamba. El FF se mantiene relativamente constante en 0.65 para inclinaciones de 0°, 18° y 28°, y aumenta ligeramente a 0.66 en inclinaciones de 21°, 45° y 65°. Este comportamiento sugiere que, en Santa Cruz, el módulo es menos sensible a los cambios en el ángulo de inclinación, pero no alcanza los mismos niveles de eficiencia que en Cochabamba. Esto podría deberse a factores como la mayor humedad y la presencia de nubes, típicas de regiones con clima tropical, que reducen la irradiancia solar directa.

Cochabamba presenta un factor de llenado más alto en general, lo que indica que los módulos fotovoltaicos en esta ciudad tienen un mejor rendimiento en términos de eficiencia eléctrica, debido principalmente a su mayor altitud, que reduce la dispersión de la radiación solar y permite una mayor irradiancia directa. En contraste, Santa Cruz tiene un factor de llenado ligeramente más bajo, lo que sugiere que los módulos son menos eficientes en esta ubicación, atribuible a su menor altitud y al clima tropical, que introduce mayores variaciones en la irradiancia debido a la presencia de nubes y humedad.

En Cochabamba, se recomienda utilizar ángulos de inclinación cercanos a 0° para maximizar el factor de llenado y, por lo tanto, la eficiencia del módulo, aunque es importante considerar factores como la limpieza y la acumulación de polvo, que pueden ser más problemáticos en una configuración horizontal. En Santa Cruz, dado que el factor de llenado es menos sensible a los cambios en el ángulo de inclinación, se pueden utilizar ángulos más flexibles, como 21° a 28°, que ofrecen un buen equilibrio entre la captación de energía y la facilidad de mantenimiento, además de requerir sistemas de limpieza más frecuentes debido a la mayor acumulación de polvo y humedad en esta región.

El análisis del factor de llenado en ambas ciudades muestra que Cochabamba tiene un mejor rendimiento en términos de eficiencia eléctrica, gracias a su mayor altitud y menor dispersión de la radiación solar. En Santa Cruz, aunque el rendimiento es ligeramente inferior, los módulos son más tolerantes a variaciones en el ángulo de inclinación. Para maximizar la generación de energía, en Cochabamba se recomienda una inclinación cercana a 0°, mientras que, en Santa Cruz, ángulos entre 21° y 28° son más adecuados. Estas consideraciones son clave para optimizar la inversión en

sistemas fotovoltaicos y garantizar un rendimiento óptimo en cada ubicación.

6. Conclusiones

- Cochabamba tiene un mejor rendimiento fotovoltaico debido a su mayor altitud, lo que se refleja en un factor de llenado más alto (hasta 0.748) y una mayor eficiencia en comparación con Santa Cruz.
- El ángulo de inclinación óptimo en Cochabamba es cercano a 0°, ya que maximiza el factor de llenado y la eficiencia, aunque se debe prestar atención al mantenimiento para evitar la acumulación de polvo.
- En Santa Cruz, el factor de llenado es menos sensible a los cambios de inclinación, lo que permite mayor flexibilidad en la instalación, con ángulos recomendados entre 21° y 28° para equilibrar eficiencia y mantenimiento.
- La altitud y el clima influyen significativamente en el rendimiento, ya que Cochabamba, con mayor altitud y menor humedad, presenta mejores resultados que Santa Cruz, donde el clima tropical reduce la irradiancia directa.
- El mantenimiento es clave en ambas ciudades, pero especialmente en Santa Cruz, donde la humedad y el polvo requieren limpiezas más frecuentes para mantener la eficiencia del sistema fotovoltaico.

7. Bibliografía

[1] M. d. E. y. Minas, «recursosyenergia.gob.ec,» 2023. [En línea]. Available: https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2024/08/BEN_2023-cap_1.pdf. [Último acceso: 25 01 2025].

[2] L. Hora, «.lahora.com.ec,» 23 10 2024. [En línea]. Available: https://www.lahora.com.ec/pais/coca-codo-sinclair-5-verdades-funcionamiento-problemas-estructurales-hidroelectrica/. [Último acceso: 25 01 2025].

[3] C. EP, «celec.gob.ec,» 31 05 2024. [En línea]. Available: https://www.celec.gob.ec/wp-content/uploads/2024/05/Folleto-PROYECTOS-FOTOVOLTAICOS-ECU-2024-2-26-FEB.pdf. [Último acceso: 25 01 2025].

[4] E. Comercio, «elcomercio.com,» 06 10 2024. [En línea]. Available: https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/paneles-solares-auge-ecuador-cortes-de-luz.html. [Último acceso: 25 01 2025].

[5] I. R. O. Lafuente, «Caracterización de un módulo Fotovoltaico (Laboratorio Remoto),» Bolivia, 2024.

[6] M. C. F. A. S. F. M. V. L. Raynel Díaz Santos, «http://scielo.sld.cu/,» 12 2018. [En línea]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012018000300002. [Último acceso: 25 01 2025].